

Blast and Impact Engineering

Vincent Denoël

GCIV2050-1 // Ouvrages du génie civil sous actions accidentelles et exceptionnelles

Année académique 2014-2015

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Intro -
Généralités

Impacts

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Explosions

Phénoménologie

Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Lignes directrices

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Phénoménologie

Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Définitions

Action accidentelle : (EC1) actions généralement de courte durée qui ont peu de chance de se produire avec une grandeur significative pendant un intervalle de temps considéré au cours de la durée de vie de projet

Explosion : (EC1) réaction chimique rapide de poussière ou de gaz dans l'air résultant en de hautes températures et surpressions

Impact : (Lar) Choc ; Fait pour un corps ou un projectile de venir en frapper un autre

Action très rapide → besoin de prendre en compte l'inertie de la structure
→ négliger l'amortissement

Le projet de bâtiment doit prendre en compte :

- les actions permanentes G
- les actions variables Q
- les actions accidentelles A .

Dans l'Eurocode, deux actions sont explicitement définies comme accidentelles : les impacts et les explosions.

Eurocode 1 - Partie 1-7

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Partie 1-7 : actions accidentelles dues aux impacts et explosions

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

contient :

- description des principales **stratégies de sécurité** et les **conditions** qui doivent être prises en considération dans le cas de circonstances exceptionnelles en général
- modèles détaillés pour l'estimation de valeurs de calcul des charges accidentelles (exceptionnelles) causées par des **chocs** ou des **explosions**

ne contient pas :

- charges à imputer au sabotage ou à la guerre
- phénomènes naturels extrêmes tels que les tornades, les érosions extrêmes ou la chute de rochers (quoique pour ces phénomènes, on peut suivre un chemin analogue à celui décrit dans cette partie), feu (→EC1.1-2), tremblements de terre (→EC8).
- information relative à la nécessité de considérer une action accidentelle dans le calcul (c'est une mission pour les autorités nationales compétentes ou pour l'édificateur privé).

Exemples de dégâts (explosion)

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités
Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

L'explosion de Halifax se produisit le 6 décembre 1917 à Halifax lorsqu'un navire français transportant des munitions, le Mont-Blanc, entra en collision avec un navire norvégien, le Imo, qui se rendait en Belgique. Le Mont-Blanc prit feu et explosa, tuant 2 000 personnes et en blessant des milliers d'autres. L'explosion engendra un tsunami, et une onde de choc si puissante qu'elle cassa des arbres, plia des rails de chemin de fer et démolit des édifices, transportant les fragments sur des centaines de mètres. L'explosion fut entendue à 420 kilomètres de distance.



Ce fut la plus grande explosion créée par l'activité humaine jusqu'au premier essai atomique en 1945 et elle figure toujours parmi les plus grandes explosions non-nucléaires artificielles.

Exemples de dégâts (terrorisme)

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception anti- terroriste



Murrah Federal Building (Oklahoma City).

Une bombe a explosé dans la zone de déchargement, détruisant deux colonnes principales du bâtiment et causant la rotation d'une poutre principale. Les étages du dessus se sont effondrés progressivement, permettant ainsi à l'onde de pression de pénétrer dans le bâtiment [TNT Equiv= 2 t. Pressure 70 MPa. Stand-off distance : 5 m. 166 killed].

Exemples de dégâts (terrorisme?)

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

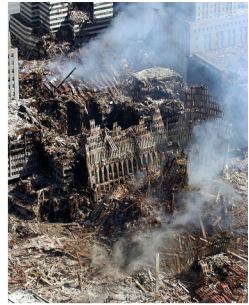
Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste



Le 11 septembre 2001, à 8 h 46, le Vol 11 American Airlines entra en collision avec la façade nord de la tour Nord. 17 minutes plus tard, à 9 h 03, le Vol 175 United Airlines s'écrasa dans la tour Sud. Ces deux avions étaient passés sous le contrôle de pirates de l'air d'Al-Qaïda. La tour Sud s'effondra à 9 h 59 et la tour Nord à 10 h 28 ainsi que le Marriott World Trade Center. La tour n°7 du complexe s'effondra plus tard dans l'après-midi à 17 h 20. Les 4 autres bâtiments encore debout subirent des dommages importants et furent démolis par la suite. Les attentats du 11 septembre 2001 causèrent 2 750 victimes. Les 1,8 million de tonnes de débris du World Trade Center fumèrent pendant 99 jours (Une mare d'acier fondu fut retrouvée respectivement dans les fondations des trois bâtiments WTC1, WTC2, WTC7) et plus de 8 mois furent nécessaires pour assurer le nettoyage du site, opération conduite par des milliers de personnes.

Destruction de bâtiments par impact / explosif

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception anti- terroriste



Stratégies pour limiter les effets d'actions accidentelles

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

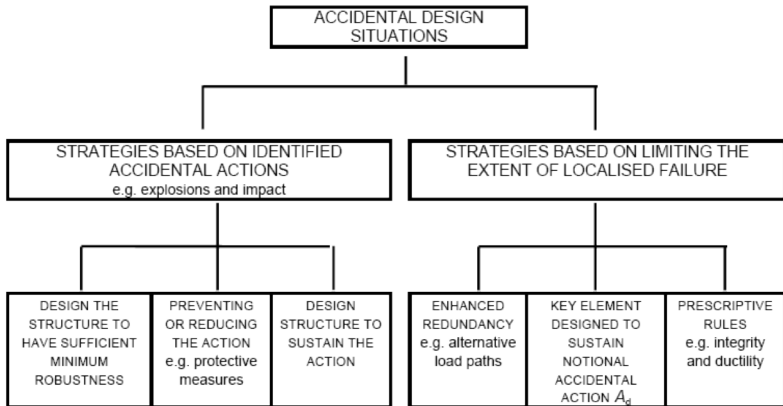
Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste



Actions accidentelles à considérer

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Les actions à considérer dépendent :

- de l'existence de mesures destinées à les réduire ou les empêcher
- de la probabilité d'existence de l'action identifiée
- des conséquences d'une ruine locale ou d'un effondrement dû à l'action accidentelle
- de la perception publique du danger
- du niveau de risque accepté

Impossible d'assurer un dimensionnement parfaitement résistant

→

Principe EC1

Une ruine localisée peut être acceptable, si elle ne met pas en danger la stabilité globale de la structure et permet la mise en place de mesures d'urgence (évacuation des lieux, fermeture temporaire des lieux)

Actions accidentelles à considérer

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités
Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

| Conséquences | Exemple de bâtiments et ouvrages de génie civil | Attitude du concepteur |
|--------------------------|---|--|
| Conséquences élevées | Tribune de stade, salle de concert | Dans certains cas, analyse de risque et études spéciales, dynamiques, non linéaires, interaction action-structure |
| Conséquences moyennes | Bâtiment d'habitation ou de bureau, bâtiment public de bureau | Utilisation d'analyses simplifiées où l'action est représentée par des forces statiques "équivalentes" à l'action ou respect de prescriptions standard |
| Conséquences faibles | Bâtiment de stockage de produits agricoles, serres | Pas de considération d'action accidentelle |

Stratégies pour limiter les effets d'actions accidentelles

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

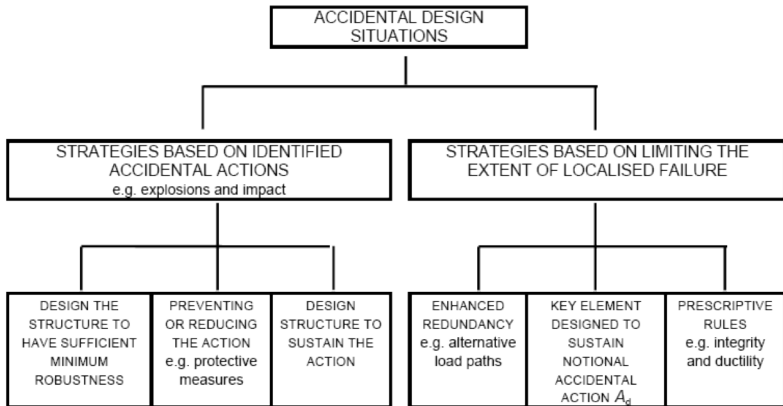
Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste



Lignes directrices

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Phénoménologie

Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités
Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Données du problème :

- caractéristiques structurelles (raideur, résistance, géométrie,...) → étape de vérification
- soit **énergie injectée**, soit **force appliquée** (et son évolution au cours du temps)

(i) énergie injectée : facile à utiliser, sécuritaire (?),...

(ii) force appliquée : besoin de résoudre l'équation du mouvement

Exemple de calcul - Energie injectée connue

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

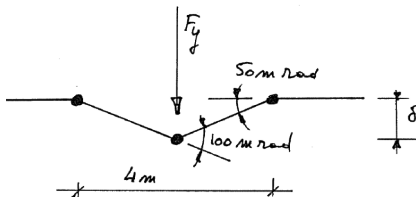
Explosions

Conception
anti-
terroriste

Une borne supérieure de l'énergie injectée est souvent calculable à partir de la physique du phénomène gouvernant l'état de la sollicitation (quelques instants avant l'impact).

Exemple.

Un profil de barrière de sécurité en acier S355 a un $W_{pl} = 47.103 \text{ mm}^3$. La capacité de rotation plastique avant perte de résistance par voilement est de $\theta_{max} = 100 \text{ mrad}$. L'entre distance des appuis est de 4 m. Est-ce suffisant pour arrêter un véhicule de $M = 1500 \text{ kg}$ à $v = 30 \text{ km/h}$?



Exemple de calcul - Energie injectée connue

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Energie injectée :

$$E_{in} = \frac{1}{2} M v^2 = 52000 \text{ Nm} = 52 \text{ kJ} \quad (1)$$

Energie disponible (avec $f_y = 355 \text{ MPa}$) :

$$E_{dis} = 2 M_{pl} \theta_{max} = 2 f_y W_{pl} \theta_{max} = 3300 \text{ Nm} = 3.3 \text{ kJ} \quad (2)$$

→ profil sous-dimensionné d'un facteur 15!

(il faudrait un IPE300 pour dissiper l'énergie du choc! A discuter :
choix du modèle, borne sur l'énergie)

Rappels de dynamique

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Action très rapide → besoin de prendre en compte
l'inertie de la structure
→ négliger l'amortissement

Modèle 1 DDL (élastique, linéaire) :

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = p(t) \quad (3)$$

Modèle 1 DDL (non linéaire) :

$$m\ddot{x}(t) + f_{rappel}(t) = p(t) \quad (4)$$

Rappels de dynamique

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Dans ce cas, l'énergie injectée dans la structure est donnée par

$$E_{in}(\tau) = \int_0^\tau p(t) \dot{x}(t) dt \quad (5)$$

Elle n'est pas calculable *a priori* puisqu'il faut d'abord déterminer $\dot{x}(t)$.

Exception : impulsion parfaite où $p(t) = I \delta(t)$:

$$E_{in}(\tau) = \int_0^\tau I \delta(t) \dot{x}(t) dt = \frac{I \dot{x}(0^+)}{2} = \frac{I^2}{2M} \quad (6)$$

(résultat indépendant de $\tau \rightarrow$ l'énergie est injectée dans la structure pendant un instant infinitésimement court, puis y reste ou y est dissipée)

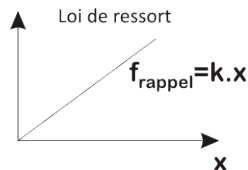
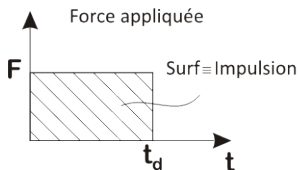
Dans tous les autres cas, il est nécessaire de résoudre l'équation du mouvement

Oscillateur linéaire

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Réponse sous une impulsion rectangulaire



$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = \begin{cases} F & \text{si } t < t_d \\ 0 & \text{si } t > t_d \end{cases} \quad (7)$$

$$x(t) = \frac{F}{k} \begin{cases} 1 - \cos \omega t & \text{si } t < t_d \\ \cos[\omega(t - t_d)] - \cos \omega t & \text{si } t > t_d \end{cases} \quad (8)$$

N.B. : $F/k = x_{\text{static}}$

N.B.II : $x(t)/x_{\text{static}} = F(t)/F \rightarrow \max \text{ de } x(t)/x_{\text{static}} = \text{facteur d'amplification dynamique}$

Oscillateur linéaire

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Réponse sous une impulsion rectangulaire de durée finie t_d

Intro -
Généralités

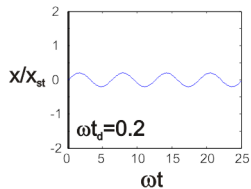
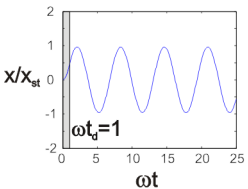
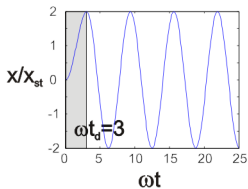
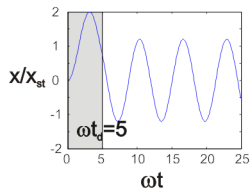
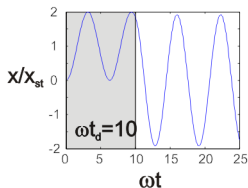
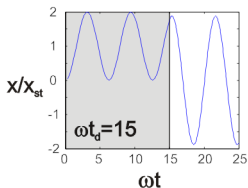
Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

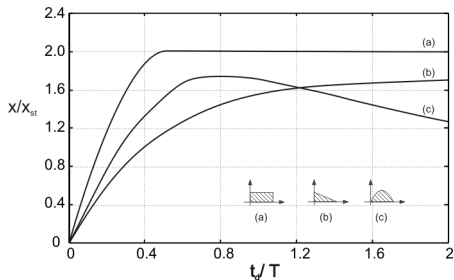
Explosions

Conception
anti-
terroriste



Observations :

- $\frac{x}{x_{st}} = 2$ pour $\omega t_d \gg$, càd $t_d \gg T$ (charge indicielle)
- $\frac{x}{x_{st}} \rightarrow 0$ pour $\omega t_d \ll$ (charge impulsionnelle)



Oscillateur linéaire

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Etude du cas particulier $\omega t_d \ll 1$ (charge impulsionnelle). Pour $t_d \rightarrow 0$, la réponse (8) devient

$$x(t) = \frac{F}{k} \lim_{t_d \rightarrow 0} [\cos[\omega(t - t_d)] - \cos \omega t] = \frac{F t_d \omega}{k} \sin \omega t = \frac{I}{m\omega} \sin \omega t \quad (9)$$

Lorsque $t_d \ll T$, c'est donc l'impulsion I qui importe et non pas la force maximale F

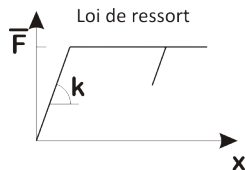
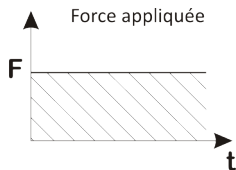
NB. Parler d'impulsion n'a pas de sens lorsque $t_d \gg T$

Oscillateur non-linéaire

2è Ma CO,
2014-2015

Réponse sous une charge indicielle

V. Denoël



$$m\ddot{x}(t) + f_{rappel}(x, t) = F \quad (10)$$

$$f_{rappel}(x, t) = \begin{cases} kx(t) & \text{si } x(t) < \frac{\bar{F}}{k} \text{ (domaine élastique)} \\ \bar{F} & \text{si } x(t) \geq \frac{\bar{F}}{k} \text{ (plateau)} \\ \bar{F} + k[x(t) - x_m] & \text{si } x(t) < \frac{\bar{F}}{k} \text{ (décharge élastique)} \end{cases} \quad (11)$$

[Etudier la réponse régime par régime]

Oscillateur non-linéaire

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Réponse sous une charge indicielle ($t_d \gg \tau$)

Intro -
Généralités

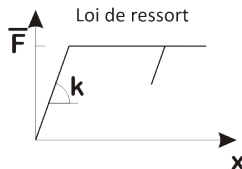
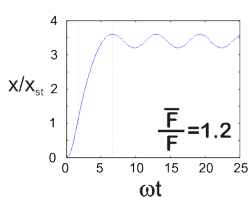
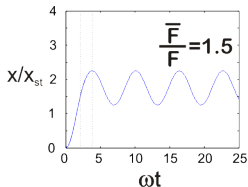
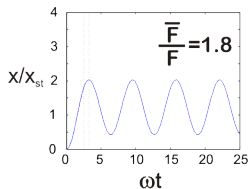
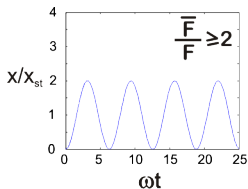
Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste



Oscillateur non-linéaire

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

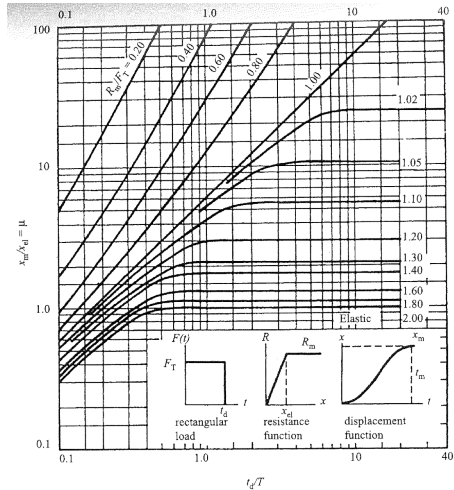
Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste



Exemple de calcul - Force appliquée connue

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

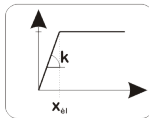
Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Exemple.

Un réservoir d'eau de 120.000 litres est soumis au souffle d'une explosion. L'explosion produit une pression $p = 50$ kPa supposée agir sur une surface $\Omega = 20$ m² de façon constante pendant une durée $t_d = 100$ ms. La raideur transversale du réservoir soumis à une sollicitation en tête est $k = 4.8 \cdot 10^6$ N/m et il admet un déplacement élastique $x_{él} = 42$ mm (avant un palier plastique sans écrouissage).



- 1/ La détonation produira-t-elle une plastification de la structure ?
- 2/ Si oui, quelle est la ductilité globale nécessaire à conférer à la structure ?

Exemple de calcul - Force appliquée connue

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Grandeurs fondamentales du problème :

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

| | |
|--------------------|--|
| Force appliquée : | $F = p\Omega = 10^6 \text{ N}$ |
| Pulsation propre : | $\omega = \sqrt{k/M} = 6.3 \text{ rad/s}$ |
| Période : | $T = \frac{2\pi}{\omega} = 1 \text{ s}$ |
| Palier plastique : | $\bar{F} = k x_{\text{él}} = 2.10^5 \text{ N}$ |
| Impact ? : | $t_d/T = 0.1 \rightarrow \text{où}$ |
| Plastification ? : | $\bar{F}/F = 0.2 \rightarrow \text{où}$ |

($\bar{F}/F = 0.2$ indique qu'il y aura plastification, mais ...)

1. Supposons qu'il n'y ait pas de plastification.

1.a. le coefficient d'amplification dynamique (figure p.23) vaut

$$t_d/T = 0.1 \Rightarrow x_{\max}/x_{st} \simeq 0.6 \quad (12)$$

Puisque $x_{st} = F/k = 20.8 \text{ cm}$, $x_{\max} \simeq 12.5 \text{ cm}$.

Exemple de calcul - Force appliquée connue

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

1.b. (autre méthode) Puisque $t_d/T \ll$, on peut assimiler la force à une impulsion d'intensité

$$I = F t_d = 10^5 N s \quad (13)$$

et donc, par (9)

$$x_{max} = \frac{I}{M\omega} = 13 \text{ cm.} \quad (14)$$

(ce qui est naturellement très proche du résultat obtenu en 1.a.)

Puisque $x_{max} > x_{él}$, il y aura plastification dans le système de contreventement.

Exemple de calcul - Force appliquée connue

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Généralités

Calcul d'une
structure sous
charge de
courte durée

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

2. Calcul avec oscillateur non-linéaire

Pour $\bar{F}/F = 0.2$ et $t_d/T = 0.1$, le graphique de la p. 27 donne

$$\frac{x_{max}}{x_{él}} \simeq 5.26 \Rightarrow x_{max} = 22 \text{ cm} \quad (15)$$

ce qui signifie que la ductilité locale dans les contreventements doit être suffisante pour produire une ductilité globale de 6.

Alternative : approche énergétique.

On suppose que $E_{in} = \frac{I^2}{2M}$ (pas trop mauvais car $t_d \ll T$), soit $E_{in} = 41667 \text{ Nm}$ (à comparer avec la vraie valeur 40296 Nm)

L'énergie stockée et dissipée à un instant de vitesse nulle est

$$E = \frac{1}{2} \bar{F} x_{él} + \bar{F} (x_{max} - x_{él}) \quad (16)$$

En égalant E et E_{in} , on trouve $x_{max} = 23 \text{ cm}$ ($\mu = 5.46$).

Lignes directrices

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Intro -
Généralités

Impacts

Impacts selon
l'EC1

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Explosions

Phénoménologie

Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Impacts selon l'EC1

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts
Impacts selon
l'EC1

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Eurocode 1 - Partie 1-7, Section 4

Prescription de forces appliquées pour :

- collision de véhicules, de trains, de bateaux
- atterrissage brutal d'un hélicoptère sur une toiture

Les constructions à considérer sont

- les garages
- les entrepôts avec chariot élévateur
- les bâtiments situés aux alentours de routes ou de chemins de fer, les ponts.

[Pour les constructions où les dégâts peuvent être importants (catégorie 3), une analyse technique avancée est conseillée comme décrit à l'annexe A. Pour les chocs violents sur des éléments structurels verticaux (piliers, murs,...), on peut prendre les charges (valeurs de calcul) statiques horizontales équivalentes. La norme contient des tables pour les ponts, les trains, les bateaux]

Forces équivalentes de l'EN1991-1-7

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Impacts selon
l'EC1

Explosions

Conception
anti-
terroriste

| Category of traffic | Force F_{dx} ^a [kN] | Force F_{dy} ^a [kN] |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Motorways and country national and main roads | 1000 | 500 |
| Country roads in rural area | 750 | 375 |
| Roads in urban area | 500 | 250 |
| Courtyards and parking garages with access to: | | |
| - Cars | 50 | 25 |
| - Lorries ^b | 150 | 75 |
| ^a x = direction of normal travel, y = perpendicular to the direction of normal travel. ^b The term "lorry" refers to vehicles with maximum gross weight greater than 3,5 tonnes. | | |

Forces équivalentes de l'EN1991-1-7

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Impacts selon
l'EC1

Explosions

Conception
anti-
terroriste

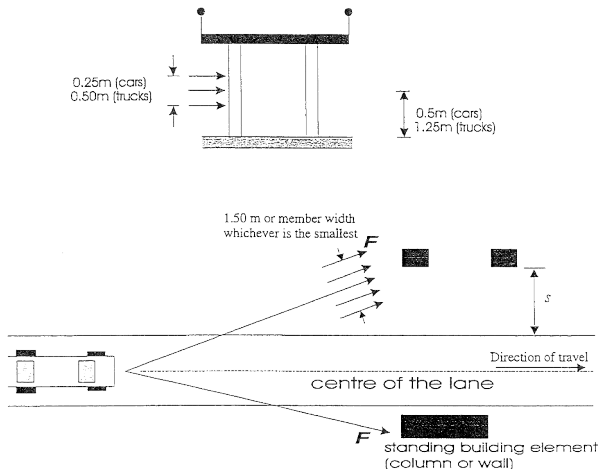


Figure 4.1: Collision force on structural elements near traffic lanes

Lignes directrices

2^e Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions
Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Phénoménologie

Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Une explosion est une réaction chimique rapide de gaz, de poussières ou de vapeurs dans l'air, qui résulte en de hautes pressions et températures.

Les pressions atteintes sont fonction :

- du type de produit, de sa concentration dans l'air, de sa distribution dans l'air
- de la source d'allumage
- de la présence d'obstacles, de la taille des obstacles et de leur forme
- des ouvertures du local si l'explosion est intérieure (les ouvertures permettent une baisse de pression) et de la résistance des parois du local (les parois cèdent à une certaine pression et deviennent des ouvertures).

Illustration d'évolution de pressions

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Phénoménologie

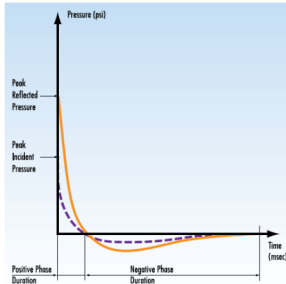
Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste

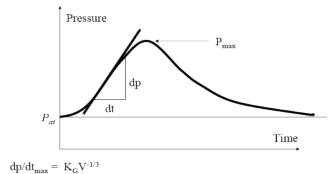
Les produits explosifs à haute énergie convertissent efficacement dans une « détonation » le potentiel d'énergie chimique. Il en résulte un « souffle » destructeur (anglais : « blast »). L'onde de choc se propage à vitesse supersonique (jusqu'à 9 km/s).

Dans les produits explosifs à basse énergie, une partie importante des composants est consommée dans une « déflagration », un processus de combustion subsonique (vitesse inférieure à 1300 m/s) qui se propage par conductivité thermique et qui est moins destructif qu'une détonation.

Produit explosif à haute énergie



Produit explosif à basse énergie



Caractère spatio-temporel de la sollicitation

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

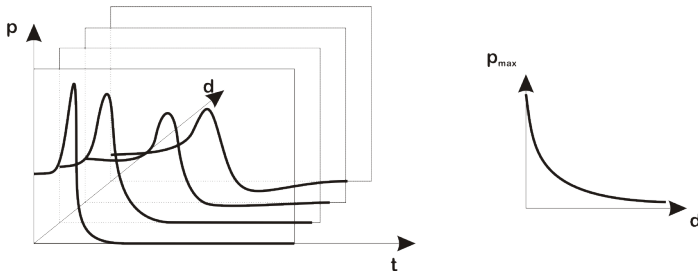
Impacts

Explosions

Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste



- Evolution de la pression au cours du temps et en fonction de la distance par rapport à l'explosion -

Caractéristiques d'explosions (intérieur)

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

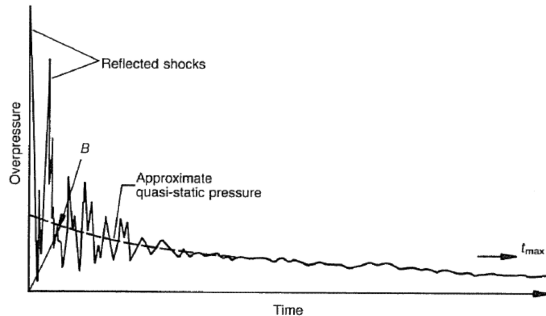
Impacts

Explosions

Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste



- Existence d'ondes de choc réfléchi et diffractée - Définition d'une loi de pression lissée équivalente -

Effets d'une explosion

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

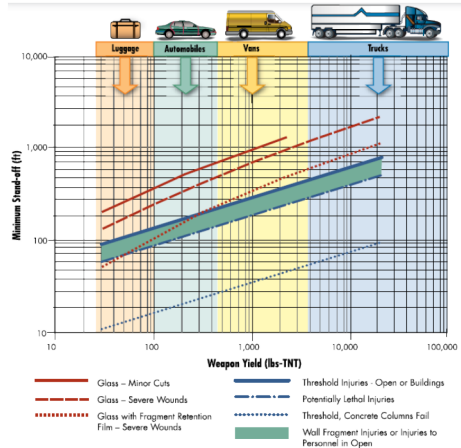
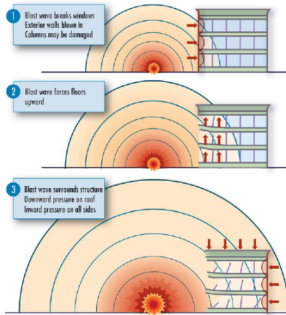
Impacts

Explosions

Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste



Exemples de charges et équivalent TNT

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts











Explosions

Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste

Table 1-1: Safe Evacuation Distances from Explosive Threats






| Threat Description | Explosive Mass* (TNT equivalent) | Building Evacuation Distance** | Outdoor Evacuation Distance*** |
|---|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|  Pipe Bomb | 5 lbs 2.3 kg | 70 ft 21 m | 850 ft 259 m |
|  Suicide Belt | 10 lbs 4.5 kg | 90 ft 27 m | 1,080 ft 330 m |
|  Suicide Vest | 20 lbs 9 kg | 110 ft 34 m | 1,360 ft 415 m |
|  Briefcase/ Suitcase Bomb | 50 lbs 23 kg | 150 ft 46 m | 1,850 ft 564 m |
|  Compact Sedan | 500 lbs 227 kg | 320 ft 98 m | 1,500 ft 457 m |
|  Sedan | 1,000 lbs 454 kg | 400 ft 122 m | 1,750 ft 534 m |
|  Passenger/ Cargo Van | 4,000 lbs 1,814 kg | 640 ft 195 m | 2,750 ft 838 m |
|  Small Moving Van/ Delivery Truck | 10,000 lbs 4,536 kg | 860 ft 263 m | 3,750 ft 1,143 m |
|  Moving Van/ Water Truck | 30,000 lbs 13,608 kg | 1,240 ft 375 m | 6,500 ft 1,982 m |
|  Semi-trailer | 60,000 lbs 27,216 kg | 1,570 ft 475 m | 7,000 ft 2,134 m |

* Based on the maximum amount of material that could reasonably fit into a container or vehicle. Variations are possible.

** Governed by the ability of an unoccupied building to withstand some damage or collapse.

*** Governed by the greater of fragment throw distance or glass breakage/falling glass hazard distances. These distances can be reduced for personnel wearing ballistic protection. Note that for pipe bombs, vehicle bombings, and briefcase/suitcase bombs are assumed to have a fragmentation characteristic that requires greater stand-off distances than an equal amount of explosives in a vehicle.

Table 1-2: Safe Evacuation Distances from LPG Threats

| Threat Description | LPG Mass/Volume | Fireball Diameter* | Safe Distance** |
|--|---|--------------------|-------------------|
|  Small LPG Tank | 20 lbs/5 gal 9 kg/19 l | 40 ft 12 m | 160 ft 48 m |
|  Large LPG Tank | 100 lbs/25 gal 45 kg/95 l | 69 ft 21 m | 276 ft 84 m |
|  Commercial/ Residential LPG Tank | 2,000 lbs/500 gal 907 kg/1,893 l | 184 ft 56 m | 736 ft 224 m |
|  Small LPG Truck | 8,000 lbs/2,000 gal 3,630 kg/7,570 l | 292 ft 89 m | 1,168 ft 356 m |
|  Semi-tanker LPG | 40,000 lbs/10,000 gal 18,144 kg/37,850 l | 499 ft 152 m | 1,996 ft 608 m |

* Assuming efficient mixing of the flammable gas with ambient air.

** Determined by U.S. firefighting practices wherein safe distances are approximately four times the flame height. Note that an LPG tank filled with high explosives would require a significantly greater stand-off distance than if it were filled with LPG.

Lignes directrices

2^e Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions
Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Phénoménologie

Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Explosions selon l'EC1

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste

Eurocode 1 - Partie 1-7, Section 5

Prescription de forces appliquées pour : réaction chimique de gaz ou de poussière avec l'air dans un local avec ou sans ouverture.

- Constructions de catégorie 1, pas de considération d'explosions
- Constructions de catégorie 2, il suffit de montrer que **les éléments clés et leurs liaisons résistent à une pression statique équivalente** qui est donnée par la norme.
- Constructions de catégorie 3, il faut faire une analyse plus avancée dont les caractéristiques essentielles sont décrites dans l'annexe B.

Définition

Element clé : élément de la structure essentiel à sa stabilité dont la ruine engendrerait des dégâts disproportionnés et/ou l'effondrement de la structure

Explosions selon l'EC1

2è Ma CO,
2014-2015

Importance du confinement

V. Denoël

Intro -
Généralités

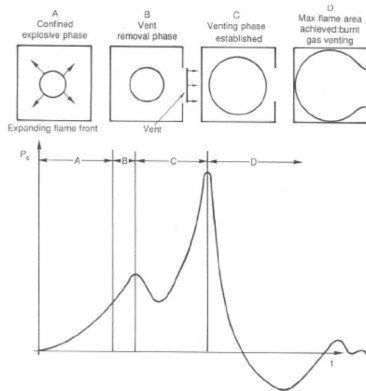
Impacts

Explosions

Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste



[NB : la pression peut monter jusque 1500 kN/m^2 pour une chambre parfaitement confinée et non ventilée!]

Explosions selon l'EC1

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions
Phénoménologie

Explosions
selon l'EC1

Conception
anti-
terroriste

Option 1 (sécuritaire)

Dimensionner les éléments clés pour une pression de calcul $p_d = 20 \text{ kN/m}^2$ (direction la plus défavorable)

[!!! prendre en compte la descente de charge des pressions appliquées sur les éléments adjacents]

Option 2

Soit V , le volume de la pièce (en m^3). Soit A_v , l'aire des composantes de ventilation (en m^2) et p_v la pression statique uniforme sous laquelle ils périssent (en kPa). La pression de calcul p_d (en kPa) est le maximum de deux valeurs

$$p_{d1} = 3 + p_v$$

$$p_{d2} = 3 + \frac{p_v}{2} + 0.04 \left(\frac{A_v}{V} \right)^2 \quad (17)$$

[relations valables si : $0.05 \text{ m}^{-1} \leq \frac{A_v}{V} \leq 0.15 \text{ m}^{-1}$ et $V \leq 1000 \text{ m}^3$]

Lignes directrices

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Intro - Généralités

Généralités

Calcul d'une structure sous charge de courte durée

Impacts

Impacts selon l'EC1

Explosions

Phénoménologie

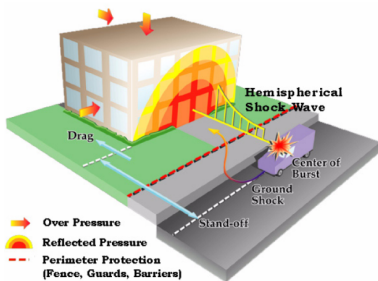
Explosions selon l'EC1

Conception anti-terroriste

Conception anti-terroriste

Conception contre les explosions volontaires (terroristes & militaires)

→ mesure du risque totalement différente



Ne suffisent pas :

- résistance stucturale
- mesures locales

Autres paramètres importants du projet

- accès au site
- organisation du site
- localisation des parkings et zones de déchargement

A éviter

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste



Eviter les “drop-off zones” et zones de
déchargement

Les trois couches de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Règle générale (FEMA) : utiliser trois couches de défense

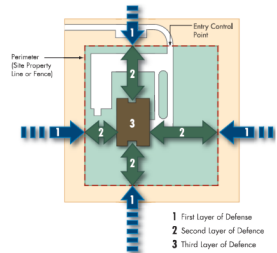
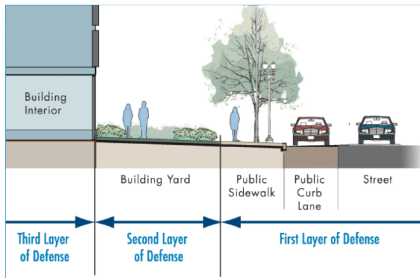
Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-terroriste

Conception
anti-terroriste



Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 1 : dispositifs d'arrêt fixes

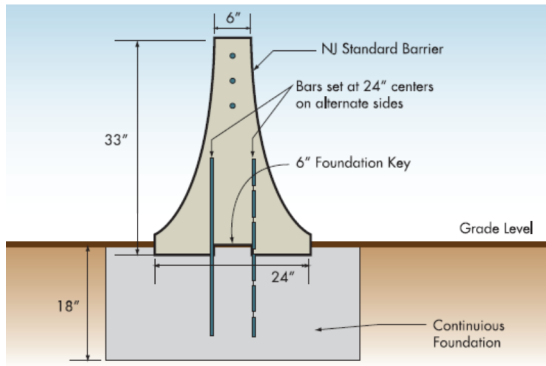


Figure 4-30:

Jersey barrier dimensions and installation for high level of protection.

SOURCE: DOD HANDBOOK: SELECTION AND APPLICATION OF VEHICLE BARRIERS, MIL-HDBK-1013/14, 1999

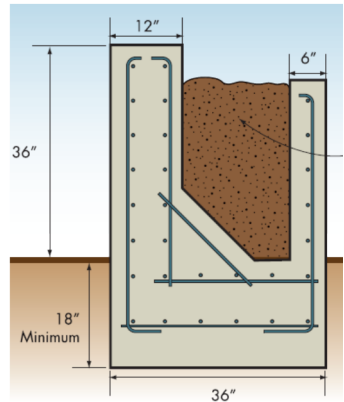
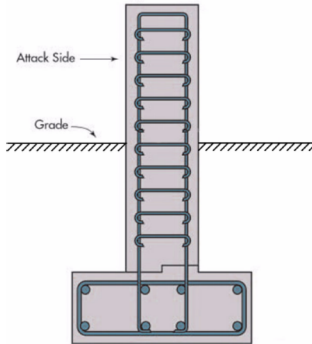
Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 1 : dispositifs d'arrêt fixes



Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 1 : dispositifs d'arrêt fixes (murets)



Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 1 : dispositifs d'arrêt fixes (bollards)



Figure 2-13
Sample bollard applications



Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 2 : dispositifs d'arrêt mobiles



Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 2 : dispositifs d'arrêt mobiles



Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

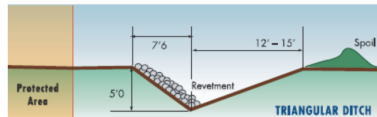
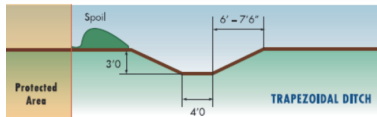
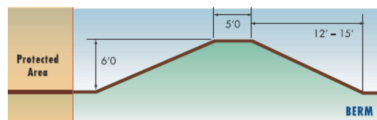
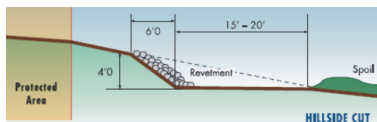
Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 3 : fossé, tranchée, digue, berme



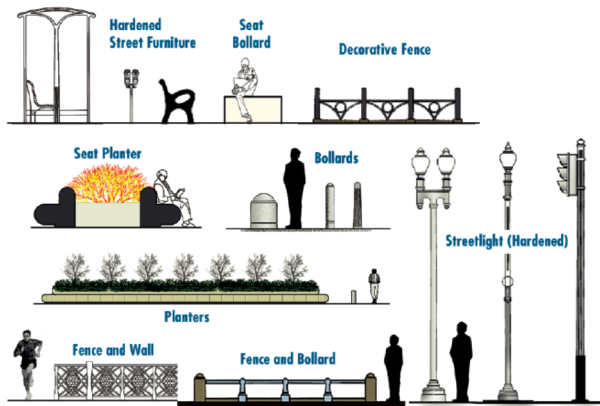
Première couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Couche I : Barrière de défense où les véhicules/piétons sont arrêtés et contrôlés.

→ solution 4 : mobilier urbain renforcé



Deuxième couche de défense

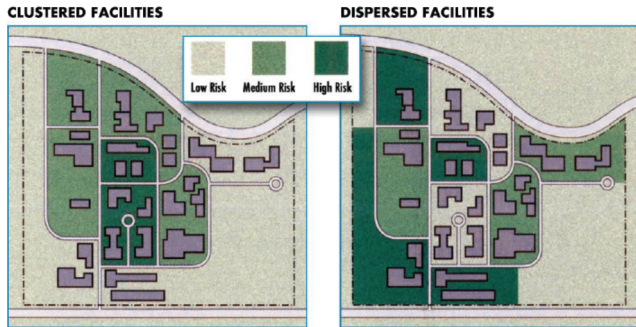
2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Organisation du site de façon à garder les risques d'explosion aussi éloignés que possible du bâtiment (dist. recommandée : 25m)

Zone 2 : Accès conditionnel (mais non limité)

Règle 1 : regrouper les bâtiments à risque



Deuxième couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

A réfléchir :

- circulation de véhicules et piétons sur le site (maintenir une vitesse limitée)
- zones de chargement/déchargement
- protection des infrastructures (électricité, gaz, eau)
- aménagement du paysage
- ventilation du bâtiment
- signalisation du site
- éclairage du site (continuous, stand-by, movable, emergency)

Deuxième couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

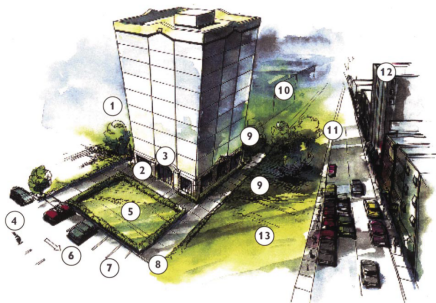
Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-terroriste

Conception
anti-terroriste



- 1.- placer les biens à risques dans le bâtiment, à proximité de pièces fréquentées
- 2.- pas de parking à l'arrière du bâtiment
- 3.- minimiser la signalisation extérieure et le renseignement sur les biens présents dans le bâtiment
- 4.- garder les poubelles et containers loin du bâtiment
- 5.- éliminer les lignes d'approche perpendiculaires au bâtiment
- 6.- placer le parking au-delà de la distance de sécurité
- 7.- illuminer l'extérieur du bâtiment
- 8.- minimiser le nombre d'accès aux véhicules
- 9.- dégager la vue autour du bâtiment
- 10.- permettre la visibilité de tous les bâtiments du site entre eux
- 11.- maximiser la distance entre le bâtiment et la limite du site
- 12.- écarter le bâtiment des points d'observation
- 13.- protéger les infrastructures

Troisième couche de défense

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Troisième couche : protection du bien/bâtiment

↗ masse, ↗ quantité acier, ↗ armaturage, ↗ épaisseur et
résistance des verres, ↗ connections

! en accord avec le design architectural du bâtiment !

ELEMENTS OF THE THIRD LAYER OF DEFENSE

- Architectural
- Structural System
- Building Envelope
- Mechanical Systems
- Plumbing and Gas
- Electrical Systems
- Fire Alarm Systems
- Communications and IT



Troisième couche de défense, structure

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Aspects structurels :

- éviter l'effondrement progressif (le plus préjudiciable en termes de vie humaines)
- renforcement de l'enveloppe (le plus préjudiciable en termes de blessures graves)

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Troisième couche de défense, conception

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Aspects de conception / architecturaux

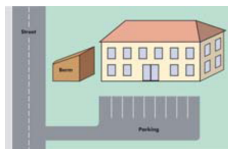
Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

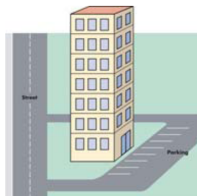
Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste



Bâtiment bas avec grande embase

- toute explosion est locale
- moins susceptible à l'effondrement progressif
- protection du bâtiment par l'environnement



Bâtiment haut avec petite embase

- effet du Souffle réduit sur les étages supérieurs
- accès plus limité au bâtiment
- possibilité d'éloigner le parking

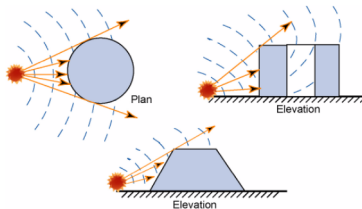
Troisième couche de défense, conception

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Aspects de conception / architecturaux :

1. Choisir une forme de bâtiment qui limite l'effet de confinement



SHAPES THAT DISSIPATE AIR BLAST



SHAPES THAT ACCENTUATE AIR BLAST

Troisième couche de défense, conception

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Aspects de conception / architecturaux - Configuration

1. Choisir une forme de bâtiment qui limite l'effet de confinement
2. Elever le rez-de-chaussée de quelques marches
3. Eviter d'exposer les éléments structurels comme les colonnes,...
4. Dessiner les toitures inclinées (cocktail Molotov, grenades, etc.)

Aspects de conception / architecturaux - Découpe de l'espace

1. Séparer les fonctionnalités à risques de niveaux différents (lobby, garage, salles de réunion, suites, ...)
2. Créer les zones à accès limité
3. Eviter les zones où l'on peut se cacher

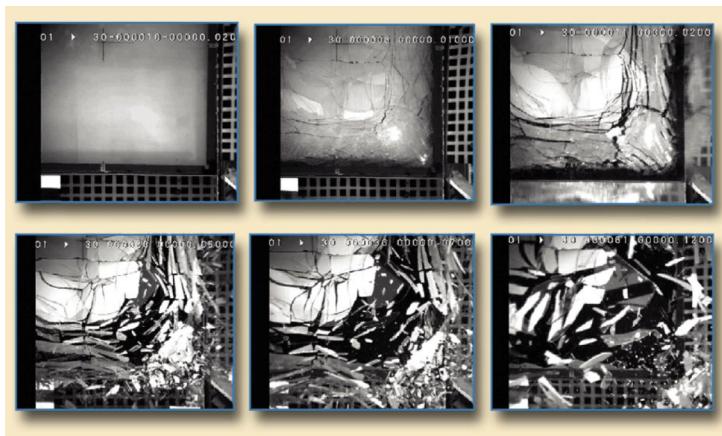
Troisième couche de défense, détails

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Détails de conception : vitrages

1. Verre détrempe (traditionnel) ($\simeq 20\text{MPa}$), fragile, coupant



Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-terroriste

Conception
anti-terroriste

Troisième couche de défense, détails

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Intro -
Généralités

Impacts

Explosions

Conception
anti-
terroriste

Conception
anti-terroriste

Détails de conception : vitrages

1. Verre détrempé (traditionnel) ($\simeq 20MPa$), fragile, coupant
2. Verre recuit ($\simeq 40MPa$) - bâtiments soumis au vent
3. Verre trempé ($\simeq 100MPa$) - casse en petits cubes (présente un certain danger en cas d'explosion)
4. Polycarbonate (très résistant, combiné à un verre traditionnel, 3 couches)

Lectures complémentaires I

2è Ma CO,
2014-2015

V. Denoël

Appendix

Lectures complémentaires



FEMA 426, (2003).

Reference Manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings.

Risk management series, FEMA.



Bangash (2009).

Shock, Impact and Explosion.

Springer Verlag.



International Journal of Impact Engineering.